工學碩士學位請求論文

청각자극에 의한 감성상태의 뇌파에 대한 카오스분석

Chaotic Analysis of the EEG In Emotional States Evoked by Auditory Stimuli

2001年 2月

仁荷大學校 大學院

電氣工學科 (制御 및 시스템 專攻)

吳 榮 稷

工學碩士學位請求論文

청각자극에 의한 감성상태의 뇌파에 대한 카오스분석

Chaotic Analysis of the EEG In Emotional States Evoked by Auditory Stimuli

2001年 2月

指導敎授 李 鍾 浩

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

仁荷大學校 大學院

電氣工學科 (制御 및 시스템 專攻)

吳 榮 稷

이 論文을 吳榮稷의 碩士學位 論文으로 認定함

2001年 2月

主審_____

副審_____

委員_____

국문 요약

본 논문에서는 청각자극에 의해 유발되는 감성상태의 뇌파를 비선형분석방법 중 하나인 카오스분석을 통해 정량화 하였다. 1차원 시계열 데이타인 뇌파신호는 생체 비선형 동역학 시스템으로부터 발생하는 Deterministic Nonlinear Chaos신호로써 랜덤한 신호와는 구분되어질 수 있다. 뇌파 시계열 데이타를 위상공간에 적절한 어트랙터로 재구성하여 상관차원, Lyapunov 지수 등의 카오스 지표들을 추출하여보면, 뇌파시계열 데이터가 무작위 적인 계에서 발생하는 랜덤한 신호가 아닌 카오스 계에서 기인함을 알 수 있고, 인간의 감성상태에 따른 뇌파를 정성적, 정량적으로 판별해 볼 수 있다. 이러한 카오스 분석방법을 토대로 긍정적 감성을 유발하는 청각자극 제시 시와 부정적 감성을 유발하는 청각자극 제시 시 뇌파의 상관차원과 Lyapunov 지수를 계산한 결과, 부정감성시의 상관차원이 긍정감성시보다 큼을 알 수 있었다. 즉, 부정감성시의 뇌의 정보처리가 더 고차원적임을 정량적으로 보여주었다. 본 연구는 향후, 인간감성을 이해하고 반응하는 감성컴퓨터의 개발에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

In this paper, a method for analyzing EEG quantitatively under certain emotional states evoked by auditory simuli is suggested. The EEG signal, 1-dimensional time series data, is a deterministic nonlinear chaotic signal generated by biological nonlinear dynamic system, and it can be discriminated from random signals. By reconstructing strange attractor for given EEG signal in the phase space and extract chaotic characteristics like correlation dimension and Lyapunov exponent, an observer is able to analyze the variation of EEG following emotional changes. This paper shows that correlation dimension of negative emotion is bigger than that of positive one by calculating the correlation dimension of both cases, which are induced by auditory stimuli. It means that information processing is more complicated in the case of negative emotion. This approach can be used to develop the intelligent computer, which understand and react on human emotions.

목 차

그 림 목 차

표 목 차

1. 서 론

인간의 감성이나 정신세계에 대한 실체를 파악하고자 하는 노력은 오늘날 의학뿐만 아니라 생물학, 물리학, 심리학, 인지과학, 신경과학 등 여러 분야에서 주 관심사로 등장하고 있다. 인간의 정서란 주어지는 환경의 변화나 외부의 물리적인 자극에 반응하여 인간 내부에서 일어나는 고도의 심리적인 체험으로 쾌감, 불쾌감 등에 대한 복합적인 감정이라 할 수 있다. 감성공학은 인간의 감성을 뇌의 활동을 통해 규명, 이를 기계 중심적 환경 및 제품에서 인간이 고려되고 중요시되는 새로운 개념의 환경 및 제품창조에 이용하는 것을 그 목적으로 하고 있다. 감성공학에서는 뇌파 등의 생체 신호를 통해 인간의 감성을 정량적으로 평가하는 작업이 이루어지고 있으며, 시각, 청각, 후각, 미각과 촉각에 대해 여러 자극을 주고 이에 대한 피험자의 감성을 뇌파를 통해 가늠해 보려 하고 있다.

뇌파는 수많은 뉴런들의 비선형적 동작을 외부에서 관측한 신호이므로 생체에서 일어나는 현상 중 가장 복잡한 비선형 시스템에서 발생된 신호라고 할 수 있다. 비선형 동역학 시스템에 대한 최근의 연구에 의하여 여러 변수를 갖는 복잡한 시스템을 분석할 수 있는 새로운 방법들이 제시되고 있다. 시스템의 외부에서 관찰된 현상으로 일정한 규칙을 발견할 수 없는 불규칙한 현상으로 보이지만 그 내부에는 결정론적인 규칙이 내재하고 있다고 보는 카오스(Chaos)의 개념은 여러 분야에서 주목받고 있다. 최근에는 생체 시스템에 대한 카오스 현상의 발견 과 카오스 이론에 근거한 분석 연구가 활

발히 진행되어 생체 시스템의 규명에 새로운 관점으로 제시되고 있다.

본 논문에서는 뇌파의 일반적인 특징과 카오스분석방법을 기술하였고 긍정, 부정의 감성을 유발하는 청각자극을 주었을 때의 뇌파를 각각 측정하여 이를 카오스 지표인 상관차원 과 Lyapunov 지수를 통해 분석하였다.

1장에서는 뇌파의 응용분야인 감성공학과 BCI(Brain Computer Interface)를 소개하였다. 2장에서는 일반적인 뇌파의 특징을 기술하였고, 3장에서는 카오스 역학계의 특징과 카오스분석법으로 사용된 상관차원과 Lyapunov 지수에 대해 설명하였다. 4장에서는 긍정, 부정 상태의 뇌파를 상관차원 과 Lyapunov 지수로 분석한 결과와 주파수영역에서의 분석결과를 정리하였다. 5장에서는 본 논문의 결론을 내고 앞으로의 과제 등을 제시하였다.

1.1. 감성공학

감성이란 외부의 물리적 자극에 의한 감각, 지각으로부터 인간의 내부에 야기되는 심리적 체험으로, 쾌적함, 고급감, 불쾌감, 불편함 등의 복합적인 감정이라고 정의할 수 있다. 이러한 인간의 감성을 정성, 정량적으로 측정 평가하고 이를 보다 편리하고 안락하며 안전하게 제품이나 환경 설계에 응용하여 인간의 삶을 쾌적하게 하고자 하는 기술이 감성공학이다.

감성공학의 구체적인 목표로는 제품, 환경에 대한 소비자의 요구(감성)를 객관적이고 과학적으로 측정할 수 있는 기술을 확보하고 소비자의 감성을 DB 구축하여 이를 바탕으로 감성의 제품, 환경 설계에 대한 응용체계를 수립하는 것이다.

국내의 경우, 1994년 G7 프로젝트의 하나인 「감성공학기술개발」과제는 요소기술, 시뮬레이터기술, 제품기술 개발 등 세 분야에서 소단위 연구가 진행되고 있다. 또한 삼성, LG, 대우 등의 가전사에서 제품의 감성설계를 위한 감성공학 연구조직을 설치하였다. 해외의 경우, 선진국에서는 이미 중진국 또는 개발도상국가들과의 차별화를 위해 제품, 환경 설계에 인간의 감성까지 고려하고자 노력하고 있다. 예로 일본에서는 1989년에 통산성과 기업체의 산업기술진흥협회가 공동으로 인간생활공학연구센터를 설립하여 감성공학분야의 연구를 해왔으며 미국, 유럽에서는 자동차, 컴퓨터관련 감성공학 연구가 정부주도하에 산, 학, 연이 참여하여 수행중이다.

1.2. BCI(Brain Computer Interface)

자동화, 기계화된 산업사회에서 기계의 성능 못지 않게 중요한 것이 기계가 인간이 사용하기에 얼마나 편리하게, 또 인간의 일상행위와 얼마나 자연스럽게 연결되게 만들어졌냐는 휴먼-시스템 인터페이스 문제이다. 키보드에서 마우스로, 마우스에서 문자나 음성으로 컴퓨터를 조작하려는 노력이 행해져 왔는데, 인간이 말을 하고 글을 쓰는 행위 대신에 생체신호를 이용해 이를 대신할 수 있다면 더욱 편리한 환경이 가능할 것이다.

BCI는 뇌파를 이용해 컴퓨터를 통제하는 인터페이스 관련 기술을 말한다. 뇌파는 뇌 신경세포의 전기적 활동에 의해 누구에게나 발생하며 사람의 활동상태에 따라 서로 다른 신호가 발생된다. 이러한 뇌파를 정보통신에 응용하는 원리는 무선통신과 같이 수신된 아날로그신호를 변조, 증폭하는 과정을 통해 컴퓨터에 전달하는 것이다. 수신된 신호는 복조 하여, 컴퓨터의 명령어로 해석된다. 예를 들어 신체장애자의 경우, 멈추려는 생각이 뇌파를 통해 확인되면, 휠체어를 손을 쓰지 않고 멈출 수 있게 하는 것이다.

간단한 원리에 비해 BCI를 실용화하기까지는 많은 연구가 필요한데, 이는 인간의 사고와 동작간 정확한 인과관계를 파악하는 것은 매우 어렵기 때문이다. 현재의 BCI기술수준은 입출력 도구를 대체할 정도의 정확성이 결여되어 있다는 점에서 보다 활발한 연구가 필요하다. 감성평가 기술은 고급감성 추구를 위한 컴퓨터 인터페이스 개발에 이용될 전망이고, BCI와 감성컴퓨터는 차세대 인간-기계 인터페이스, 의료진단 및 치료기술 등 다양한 분야에 응용되어 인간 삶의 질 향상에 기여할 것이다.

2. 뇌파(Electroencephalogram)

최초로 동물의 뇌에서 전기활동을 기록한 사람은 영국의 Coton이며, 그는 1875년에 토끼나 원숭이의 뇌표면에서 직접 전류를 기록했다. 1913년 Neminski는 개의 좌골신경을 자극하여 뇌의 표면에 나타나는 전기활동을 기록하고 그후 1925년에는 개의 뇌에서 특이한 자극을 주지 않는데도 10~15Hz와 20~30Hz로 자발적으로 변동하는 파를 기록하여 이를 대뇌전도(Electrocerebrogram)라고 명명하였다. 또한 이것과 같은 자발적 뇌 전기활동을 인간에 대해서 처음으로 기록했던 사람이 Hans Berger(1929)이다. 현재 사용되고 있는 α(alpha)파, β(beta)파는 그의 명명에 의한 것이고 Berger는 이러한 파를 총칭해서 Electroencephalogram(EEG)이라고 명명하였다.

정신현상이나 운동, 감각 등을 관장하는 최고위의 중추인 뇌는 그 중에 포함되어 있는 140억개나 되는 신경세포(neuron)상호의 결합형태나 활동에 의해서 실로 여러 가지의 움직임을 나타낸다. 이러한 활동을 외부에서 기록하는 것이 뇌파(Electroencephalogram)인데 일반적으로 두피 상에 전극을 접착하여 어느 정도 넓은 부분의 활동을 살피고자 하는 것이다. 신경세포 개개의 활동을 측정하는 방법, 신경세포군 상호의 전달을 조사하는 방법, 또는 대뇌피질표면에 전극을 설치하여 측정하는 방법 등도 있으나 이러한 것은 뇌수술이나 동물실험시 행해지는 것으로 보통은 두피상 전극에 의한 뇌파기록이 행해지고 있다. [11]

뇌는 좌우의 대뇌반구(cerebral hemisphere), 소뇌(cerebellum), 뇌간(brain stem)등으로 구성되며 두 개의 대뇌반구는 뇌량(corpus

callosum)으로 연결되어 있다. 대뇌반구의 아래에는 시상(thalamus), 시상하부(hypothalamus)로 된 간뇌(diencephalon)가 있다. 뇌에는 약 140억개의 신경세포(neuron)가 존재하며 신경세포는 세포체(soma)와 나무의 가지 같은 나누어진 수상돌기(dendrite)또는 한 개로 길게 늘린 축색(axon)으로 되어 있다. 신경세포의 전기현상에는 신경세포막의 정지 막전위(resting membrane potential), 축색돌기를 따라 전달되는 활동전위(action potential), 그리고 다른 신경세포와의 결합부분인 시냅스 후의 전위(post-synaptic potential)등 여러 전위가 있는데, 이중 시냅스 후전위가 뇌전위를 형성하는데 주된 역할을 하는 것으로 알려지고 있다.

2.1. 뇌파의 측정

일반적으로 뇌파라 하면 두피전극에서 포착된 두피뇌파(scalp EEG)를 말하는데, 전극의 종류에 따라 주로 보고자하는 부위나 뇌파 기록 목적이 다양하다. 임상적인 진료 목적에 따라 전극을 선택해 사용하여야하고 기초 의학 연구 목적으로 뇌파를 기록할 때도 목적에 따라 부착부위와 전극의 종류를 잘 선택해야 한다.

두피에 전극을 붙이고 뇌파를 측정하는 경우, 전극사이의 간격이 10%와 20%로 구성되는 국제전극배치법(ten-twenty electrode system)이 통상적으로 쓰인다. 국제전극배치 10-20 system은 가장 널리 사용되는 뇌파 전극 부착 방법으로서 각 전극별로 해당되는 뇌 부위는 그림 1과 같다. 영문자는 각각 Frontal, Central, Parietal, Temporal, Occipital을 의미하며 Fp는 Frontopolar을 의미한다.

그림 2는 머리를 위에서 본 그림으로서 각 전극간 비율이 두정부(Cz)에서 앞으로는 nasion, 뒤로는 inion, 옆으로는 양쪽 귓바퀴의 윗 부분까지를 각각 50으로 했을 때 20, 20, 10의 비율로 각 전극을 잡은 것이다. 기준전극과 활성전극사이의 전위차를 기록하는 단극유도법(통상적으로 귀에 전극부착)과 두 개의 활성전극사이의 전위차를 기록하는 쌍극유도법이 있다. 본 논문의 실험에서는 양귓볼(A1, A2)을 기준전극으로 하는 단극유도법으로 뇌파를 측정하였다. 단극유도법은 활성전극이 위치해 있는 뇌의 전위 변동에 절대치에 가까운 파를 기록할 수 있으며, 부위별 전위를 비교하기가 용이한 장점이 있다. [11]

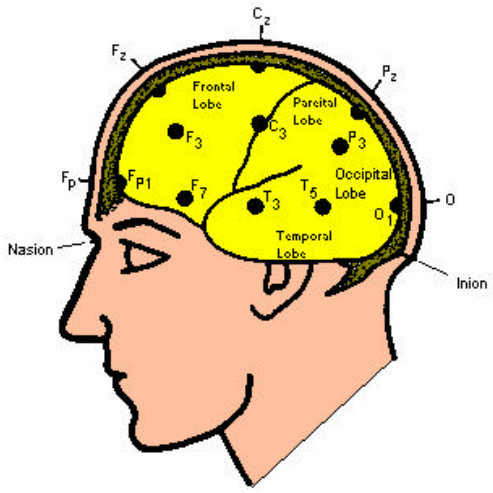


그림 1. 각 전극별로 해당되는 뇌부위

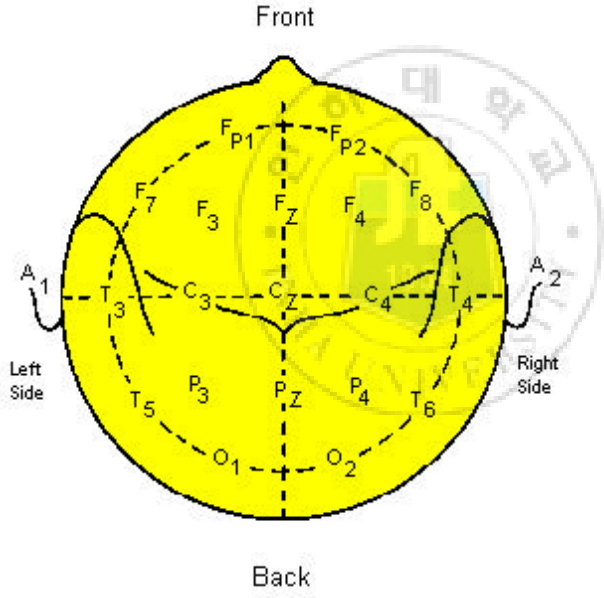


그림 2. 국제전극배치 10-20 system에 따른 전극배치

2.2. 뇌파의 주파수대역별 특징

주파수 대역에 따라 뇌파를 δ(delta)파, θ(theta)파, α(alpha)파, β(beta)파로 구분하는데, 각 파의 특징은 다음과 같다. [1]

· α파 (7.5~12.5Hz) : 정상인의 각성, 눈을 감은 상태 그리고 안정시 후두부에서 α파가 우세하게 나온다. 암산 또는 어떤 생각을 하거나 시, 청, 체감각 자극을 받거나 불안을 느끼고 긴장을 하게 되면 α파는 감소하게 된다.

· β파 (12.5~30Hz) : 정신적 작업이나 흥분시 β파가 우세하게 나타난다.

· θ파 (3.5~7.5Hz) : 정상인이 잠을 잘 때와 유아들의 뇌파에서 우세하게 나타난다. 각성상태의 성인에서 θ파가 많이 나오게 되는 경우, 의학계에서는 비 정상성으로 취급하며 뇌질환과 관계가 있다고 보고있다.

· δ파 (0.5~3.5Hz) : 정상인이 깊은 수면을 취하였을 때와 각성상태의 정상인에게 약물을 투여했을 경우 우세하게 나타난다.

본 논문에서는 실험으로 측정된 뇌파를 Fourier 변환하여, 각 주파수 대역이 차지하는 상대적인 출현량을 구하였고, 피험자가 주관적으로 가장 쾌(긍정)하다고 응답한 청각자극 제시시의 뇌파와 가장 불쾌(부정)하다고 응답한 청각자극 제시시의 뇌파가 비교되었다.

3. 카오스분석

3.1. 카오스 역학계의 특징

카오스 현상은 비선형 동역학 시스템으로부터 발생하는 특성이므로 동역학 시스템의 정의 및 해석방법을 이용하여 설명할 수 있다. 일반적으로 n차원의 역학계에서는 임의의 시각에 있어서 그 시스템의 상태 변화법칙은 n개의 상태변수의 함수에 의해서 기술된다. 이산시간 역학계의 경우 식(3- 1)처럼 나타낼 수 있다.

$$x_{t+1} = F(x_t, \mu) \quad x_t \in R^n \qquad (3\text{-}1)$$

여기서 X_t는 이산시간 t에서의 시스템 상태변수이며, F는 n차원의 비선형 사상이며, μ는 시스템 변수이다.

시스템 상태를 예측할 수 있는 선형 동역학계와는 달리 비선형 동역학계의 경우에는 내재적인 비선형성으로 인해 시스템 상태를 예측할 수 없는 경우가 발생한다. 우리가 관측할 수 있는 것은 n차원 상태공간 내에서의 안정한 상태인데, 이것을 역학계의 어트랙터(attractor)라고 한다. 특히 카오스 현상을 갖는 비선형 동역학 시스템의 경우 다음과 같은 특징이 있다. [6]

① 결정론적인 규칙을 가지면서도 주기적 현상을 보이지 않는다. 기존의 Newton역학계에서와 마찬가지로 시스템의 동태를 제어하는 수학적 미분방정식에 의해 모델화 할 수 있지만 이를 방정식과 초기조건만을 가지고는 시스템의 동태에 대한 장기예측이 불가능하다. 즉, 시스템이 일정주기를 갖고 반복하는 경우가 없다.

② 카오스 역학계는 비선형인 결정론적 방정식에 의해 기술되기 때문에, 초기치가 주어지면 그 해는 완전하게 결정된다. 그러나, 이

들의 해의 궤적은 초기치를 조금이라도 변화시키면 전혀 다른 것이 되어 버린다. 즉, 초기치에 대한 민감한 의존성을 보이게 되는데 이로 인해 카오스 역학계는 결정론적 다이나믹스를 가지면서도 장기 예측 불가능이라는 특성을 보이게 된다.

③ 카오스 역학계의 동태는 상대적으로 좁은 영역으로 제한되어있다. 이러한 특징은 특히 불규칙한 랜덤신호와 구분할 수 있는 중요한 현상인데, 랜덤신호의 동태를 위상공간에서 보면 위상공간 전체를 불규칙하게 움직이지만 카오스 역학계에서 발생하는 신호의 동태는 위상공간내의 일정한 영역내에서만 움직여 독특한 패턴을 갖는 어트랙터(attractor)를 형성한다.

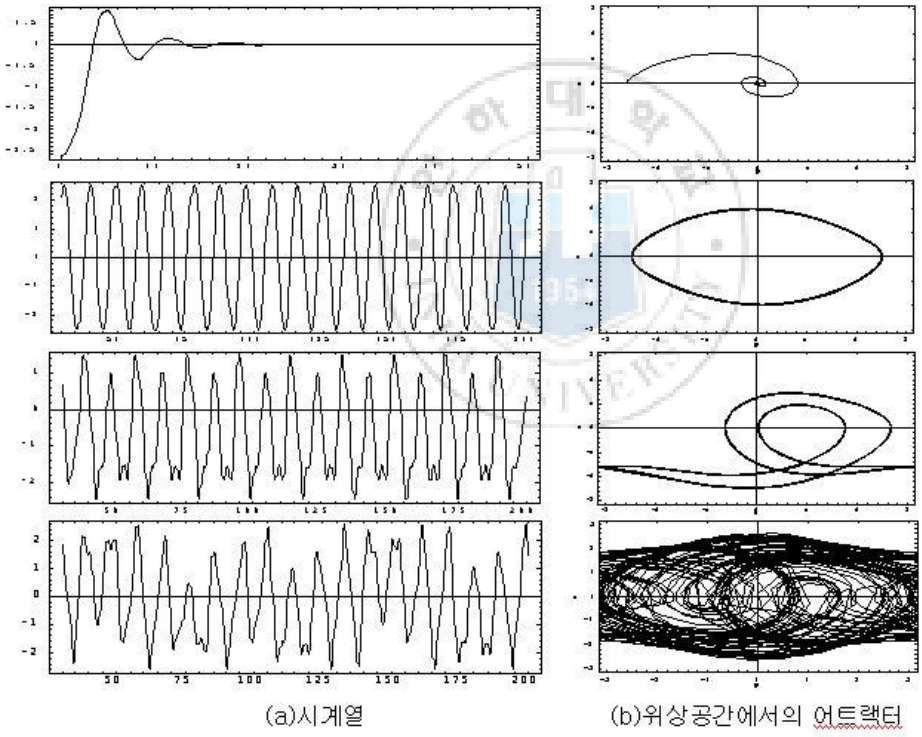


그림 3. pendulum의 θ와 ω에 따른 (a)시계열과 (b)위상공간에서의 어트랙터

그림 3은 식(3-2)에서 g를 변화시켰을 때 나타나는 θ의 시계열과 θ와 ω의 위상공간에 사상했을 때의 어트랙터를 보여주고 있다. g를 변화시키는 것에 의해, 안정된 시스템은 고정 점을 향해 궤적을 그리다가 고정점(fixed point)으로 수렴하게되고, 주기적인 신호는 완전한 폐곡선을 그려 주기 어트랙터(periodic attractor)를 형성하게 되며, 여러개의 주기를 갖는 시스템은 고리모양의 준주기 어트랙터(quasi-periodic attractor)를 형성한다. 카오스 시스템인 경우에는 매우 특이한 모양의 스트레인지 어트랙터(strange attractor)를 관측할 수 있다. [2]

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{\omega}{q} - \sin\theta + g\cos\phi \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_D \end{aligned} \qquad (3\text{-}2)$$

여기서 g는 driving force amplitude, q는 damping factor, ω_D는 angular drive frequency, θ는 angular coordinate, ω는 angular velocity를 각각 나타낸다.

3.2. 어트랙터 재구성

3.2.1. 매립

동역학 시스템의 동태는 위상공간으로 사상하여 관찰할 수 있다. 위상공간의 개념을 도입하여 시스템의 동태를 관찰하면, 시스템의 초기조건이 주어질 때 천이상태와 안정상태가 유한할 때, 시스템 상태가 매 순간에 위상공간의 점으로 표현되어 일정한 형태를 볼 수 있다. 신호를 시간에 따라 측정한 데이터는 그 계의 동력학적 정보를 갖는데 이러한 1차원 측정 시계열을 위상공간에 적절히 재구성하는 과정을 매립(embedding)이라고 하고, 위상공간에 재구성하는 방법은 Ruelle-Takens에 의한 지연좌표방법을 이용한다. [7]

N개의 scalar 시계열을 적당한 지연시간 τ와 매립차원 m 으로 위상공간에 매립시킬 수 있다.

$$N\ data = x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots x_N \quad (3\text{-}3)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= (x_1, x_{1+\tau}, \ldots\ldots, x_{1+(m-1)\tau}) \\ X_2 &= (x_2, x_{2+\tau}, \ldots\ldots, x_{2+(m-1)\tau}) \\ &\ldots\ldots\ldots \\ X_N &= (x_N, x_{N+\tau}, \ldots\ldots, x_{N+(m-1)\tau}) \end{aligned} \quad (3\text{-}4)$$

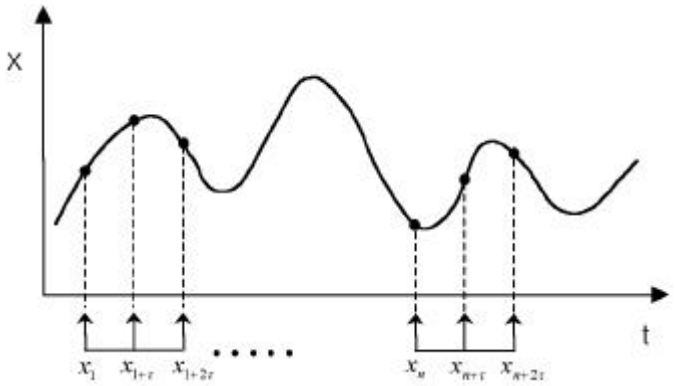


그림 4. 시계열공간

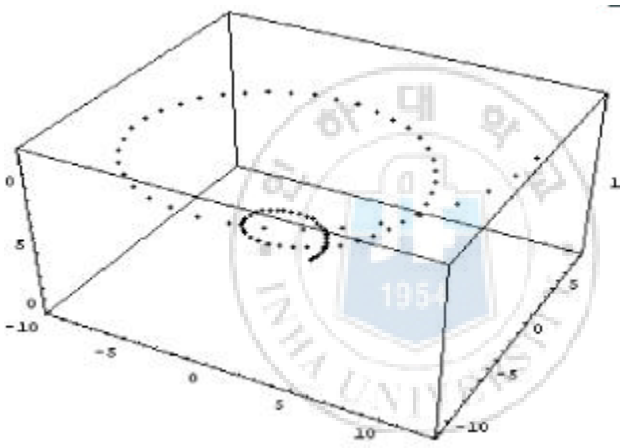


그림 5. 매립과정에 의한 3차원 위상공간

3.2.2. 지연시간(τ)의 결정

위상공간 재구성에 있어서 적절한 지연시간을 결정하는 것이 중요하고, 지연시간 τ의 선택이 위상공간에서 재구성된 궤적의 분포에 영향을 준다. Scalar시계열을 m차원 위상공간에 재구성하기 위해서는 시계열 사이의 상호 독립적인 좌표를 설정해야 한다. 일반적으로 지연시간을 너무 작게 설정하면 위상공간에 구성된 m차원 상태벡터들의 상호관련성이 커져서 어트랙터가 대각방향으로만 분포하고, 반대로 지연시간을 너무 크게 설정하면 위상공간 상태벡터들의 관련성이 없어져 어트랙터가 전체 위상공간에 퍼지게 된다.

지연시간을 결정하는 대표적인 방법으로서 자기 상관함수(Autocorrelation Function : ACF)가 있다. 자기 상관함수는 시간 경과에 따른 시계열의 선형 상관성을 정량화한 것으로 다음 식과 같이 정의된다. [12]

$$R_k = \frac{\sum Z_t Z_{t+k}}{\sqrt{\sum Z_t Z_t \sum Z_{t+k} Z_{t+k}}} \quad (3\text{-}5)$$

여기서 시간 t에서 시계열을 Z_t, k단위 시간 후의 t+k에서의 시계열을 Z_{t+k}라 하고, R_k을 자기 상관함수라고 한다. 그리고 경과 시간 k를 지연시간이라고 부른다. 자기 상관함수는 관측된 시계열의 무작위성이나 정상성 등을 분석하는데 이용되거나 시계열을 위상공간에 적절한 독립적인 성분으로 재구성할 필요가 있을 때 관련성이 최소가 되어 최초로 $R_k=0$인 시간을 지연시간으로 결정한다.

3.3. 상관적분과 상관차원추정

3.3.1. 상관적분

카오스 시스템이 갖는 자기 유사성을 정량화한 대표적인 척도로 상관차원(correlation dimension)을 들 수 있다. 차원이란 주어진 정확도내에서 어트랙터 상의 한 점의 위치를 밝히는데 필요한 정보량으로서 어트랙터를 특성 짓는 1차적인 정보이다. 특히 상관차원은 어트랙터의 기하학적인 측면의 정보를 나타내는데 시계열 데이터로부터 어트랙터를 구성하여 상관 차원을 구하게 되면 1차원의 시계열이 갖는 기하학적인 정보를 얻을 수 있어 실험을 통해 얻은 시계열을 분석하는데 매우 유용하게 사용된다. 일반적으로 위상공간의 매립차원은 그 계의 미분방정식의 수와 관계가 있고, 어트랙터차원은 데이터 점들 또는 궤적들에 의해 점유되는 위상공간의 영역으로 정의된다. 따라서 상관차원이 큰 계일수록 복잡한 구조를 가진다.

식(3-4)와 같이 m차원의 위상 공간에 매립되어 재구성된 어트랙터에 대해서, Grassberger와 Procaccia는 상관적분(correlation integral)이라고 불리는 양을 계산하는 것에 의해, 프랙탈 차원중 하나의 척도인 상관차원(correlation dimension)을 구하는 방법을 제안했다. 재구성된 어트랙터 상의 한 점을 $X_i \in R^m$이라고 하면, 상관적분은 다음 식과 같이 정의된다. [2][5]

$$C^m(R) = \lim_{N->\infty} \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N} H(R - |X_i - X_j|) \qquad (3-6)$$

여기서, H(t)는 Heavy-side함수로,

$$H(y)=\begin{cases}1 & (y \geq 0)\\ 0 & (y<0)\end{cases} \qquad (3\text{-}7)$$

이다.

이 상관적분 알고리듬의 의미를 생각해보면, 우선 m차원 공간에 있어서 재구성된 어트랙터 상의 한 점 X_i(i=1, 2, ..., N)를 생각한다. 다음으로, 나머지 (N-1)개의 점에 대해서, 중심을 X_i로 했을 때 반경 R의 m차원 초구 내로 들어가는 점 X_j(j=1, 2, ..., N ; i≠j)를 헤아린다. 이 계산을 모든 Xi를 중심으로 해서 반복함으로서, 식(3-6)에서 나타낸 상관적분이 얻어지는 것이다.

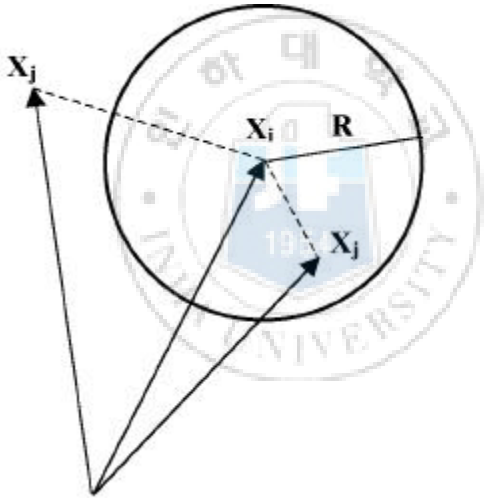


그림 6. 상관적분의 개념도

식(3-6)에 있어서 거리 $|X_i - X_j|$에 대해서는 보통 식(3-8)처럼 유클리드 거리를 이용한다. 즉, **P**=(p_1, p_2, ..., p_m), **Q**=(q_1, q_2, ..., q_m)를

임의의 m차원 벡터로서,

$$|P - Q| = \left\{ \sum_{i=1}^{m} (p_i - q_i)^2 \right\}^{1/2} \qquad (3\text{-}8)$$

이다.

3.3.2. 상관차원

R을 변화시키면서 계산된 상관적분(식(3-6))이 R의 적당한 영역에서 식(3-9)와 같이 스케일링된다면 스케일링 지수 ν(m)을 상관지수(correlation exponent)라고 한다.

$$C^m(R) \propto R^{\nu(m)} \tag{3-9}$$

식(3-9)의 양변에 대수를 취하면,

$$Log\ C^m(R) \propto \nu(m)\, Log\ R \tag{3-10}$$

이 된다.

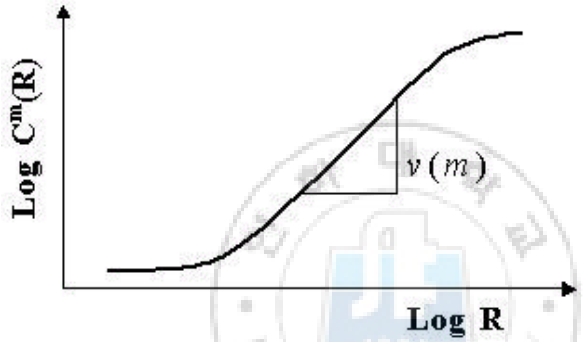


그림 7. 상관적분과 상관지수

ν(m)은 횡축으로 Log R, 종축으로 Log C^m(R)을 취해서 나타낸 그림 7에 있어서 적당한 R의 범위 내에서 직선부분의 경사로 주어지는 것이 된다. [5][9]

재구성상태 공간의 차원 m을 써서 상관지수 ν(m)을 계산한다. 실제 어트랙터의 차원보다 재구성 상태공간의 차원 m이 적으면 어트랙터는 재구성공간을 거의 다 메운다고 생각해도 좋기 때문에, ν(m)은 m과 거의 같게 된다. m의 증가와 함께 ν(m)이 포화되어 가서 점근해 가는 값 D_c가 상관차원이 된다.(그림 8)

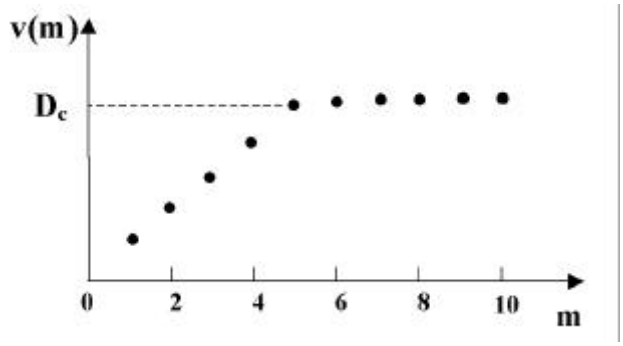


그림 8. 매립차원 m의 증가에 대한 상관지수 ν(m)의 포화

상관적분은 데이터의 총수 N->∞의 극한으로 정의되어 있는 것처럼, N은 많으면 많을 수록 좋다. 또한 추정하는 차원의 값이 크게 됨에 따라서, N의 값도 크게 할 필요가 있는 것에도 주의해야 한다. Log R 대 Log C^m(R)의 그래프를 그릴 때, 식(3-9)처럼 스케일링되어 있다고 말하기 위해서는, 직선부분이 충분히 넓은 영역에서 존재할 필요가 있다. 이 스케일링 영역은 횡축의 Log R 축에 있어서 적어도 1 decade이상이 필요하다. [9]

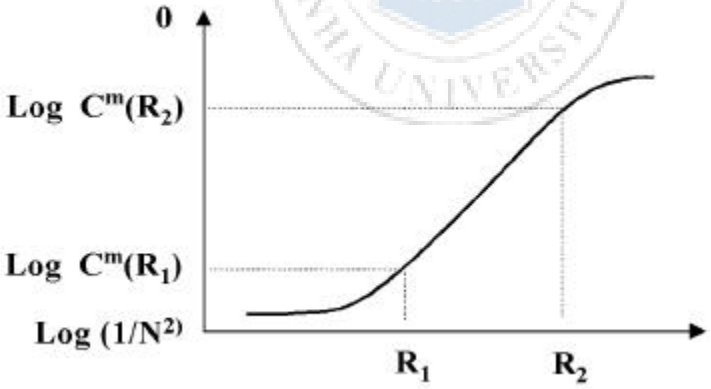


그림 9. 상관차원의 추정

그림 9와 같이 스케일링된다고 간주되는 범위를 $R_1 \leq R \leq R_2$ 라고 하면, 직선부분의 경사는 다음과 같다.

$$slope = \frac{Log_{10} C^m(R_2) - Log_{10} C^m(R_1)}{Log_{10} R_2 - Log_{10} R_1} \qquad (3\text{-}11)$$

R_1, R_2에 있어서 상관적분의 값은,

$$C^m(R_1) \geq \frac{1}{N^2}$$
$$C^m(R_2) < 1 \qquad (3\text{-}12)$$

이 되고 따라서,

$$Log_{10} C^m(R_2) - Log_{10} C^m(R_1) \leq Log_{10} N^2 \qquad (3\text{-}13)$$

이다.

직선부분은 1 decade 이상이기 때문에,

$$R_2 \geq 10 \; R_1 \qquad (3\text{-}14)$$

으로 부터,

$$\frac{Log_{10} C^m(R_2) - Log_{10} C^m(R_1)}{Log_{10} R_2 - Log_{10} R_1} \leq \frac{Log_{10} N^2}{1} = 2\, Log_{10} N \qquad (3\text{-}15)$$

이 되어

$$D_c \leq 2\, Log_{10} N \qquad (3\text{-}16)$$

를 얻을 수 있다. 역으로, 직선부분의 경사를 산출해서 상관차원의

값이 D_c라고 결론짓기 위해서는 적어도 $N \geq 10^{\frac{D_c}{2}}$ 의 데이터 수가 필요하게 되는 것이다. 즉, 추정해야 할 어트랙터의 상관차원이 8정도라면, 적어도 10^4개의 데이터수가 필요하게 된다.

3.4. 로렌쯔(Lorenz) 시계열의 상관차원

카오스 Dynamics의 예로서, 로렌쯔 어트랙터를 생각해 본다. 이것은 외부입력이 없는 3자유도의 자율계로, 운동방정식은 다음식으로 주어진다. [9]

$$\frac{dx}{dy} = 10(y - x)\ ,\ \frac{dy}{dt} = 28x - y - xz\ \ ,\ \frac{dz}{dt} = xy - \frac{8z}{3} \qquad (3\text{-}17)$$

식(3-17)에서 x성분의 시계열을 그림10에서 보여주고 있다.

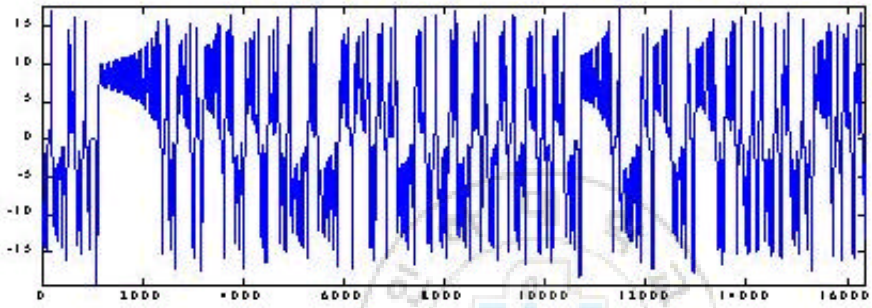


그림 10. 로렌쯔 방정식의 x성분에 대한 시계열

로렌쯔 방정식의 x성분 시계열을 자기상관함수(ACF)에 의해 구한 지연시간 16을 기준으로 3차원 위상공간으로 사상시켜 보면 그림11과 같은 어트랙터를 볼 수 있다. 어떠한 초기치에서 출발해도 시간이 지나면 반드시 스트레인지 어트랙터(strange attractor)라고 불리는 영역 속으로 수렴해 가고, 그 후 이 스트레인지 어트랙터속을 영원히 순회하며 움직이는 것을 계속하게된다. 로렌쯔계의 스트레인지 어트랙터를 특히 로렌쯔 어트랙터라고 부른다.

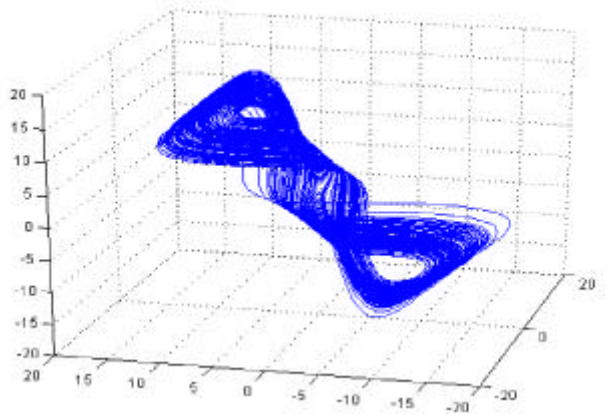


그림 11. 로렌쯔 어트랙터

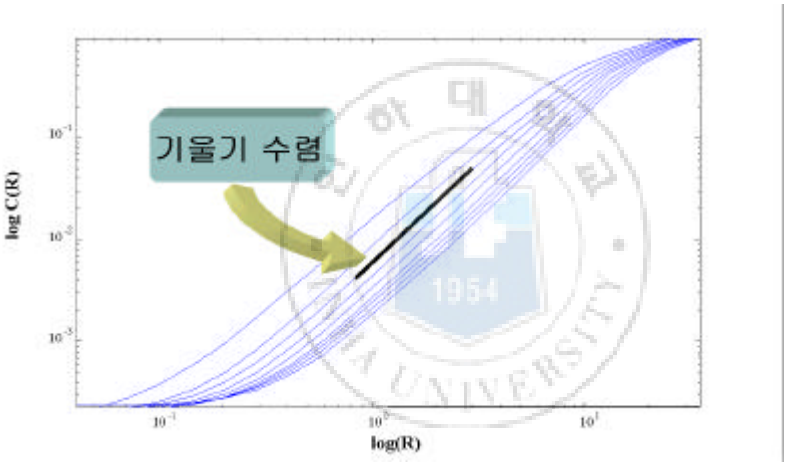


그림 12. 매립차원에 따른 상관적분곡선의 기울기 수렴

매립차원을 2부터 10까지 증가시켜가면서 Log R 과 Log C(R)에 대한 상관적분곡선의 기울기를 선형 증가구간에 대해 직선 fitting하여보면, 매립차원 3에서 상관적분곡선의 기울기가 수렴됨을 알 수 있다. 즉, 매립차원 3에서의 기울기 2.05가 상관차원이 되는 것이다.

3.5. Lyapunov 지수

Lyapunov 지수는 상관차원과 함께 카오스 시스템의 특성을 정량화할 수 있는 척도이다. 상관차원이 카오스 역학계의 기하학적 구조를 정량화한 양이라면 Lyapunov 지수는 역학적인 성질을 정량화한 값이다. 카오스 시스템은 특성상 초기 조건에 민감하게 종속된다. 즉, 초기 조건에 미세한 변화가 존재하게 되면 시간이 경과함에 따라 시스템 동태는 전혀 예측 할 수 없게 된다. 이러한 초기 조건에 대한 민감성은 위상공간상에서 인접한 궤적이 시간이 경과함에 따라 멀리 떨어져 발산하게 되는 경우이다. [2]

Lyapunov 지수는 위상공간에 있어서 이웃하는 궤도들의 발산 혹은 수렴하는 평균 지수율로서 카오스 시스템의 특성을 대수적 방법으로 분석 할 수 있는 척도이다. 즉, 초기 위치에서의 작은 거리 차이가 시간이 경과함에 따라 얼마나 지수 함수적으로 멀어지면서 발산하는지를 정량화 한 것이라 할 수 있다. Lyapunov 지수의 값이 크면 클수록 카오스 특성이 강하여 예측하기 힘들다. 특히 Lyapunov 지수가 양의 값을 갖는 경우는 시스템 동태가 지수적으로 발산하게 되어 초기 조건에 대하여 민감하게 종속된다. 본 논문에서는 Wolf의 알고리듬을 사용하였고, Lyapunov 지수를 구하는 식은 다음과 같다. [8]

$$L_1 = \frac{1}{(t_k - t_0)} \sum_{i=1}^{k} Log \frac{L'(t_i)}{L(t_{i-1})} \qquad (3\text{-}18)$$

초기에 가까운 두 점사이의 거리 L이 결정되고 정해진 전개시간이 흐른 후, 두 점사이의 새로운 거리 L'을 계산한다. 이러한 작업을 궤적위의 모든 점에서 반복하여 그 평균값을 취한다.

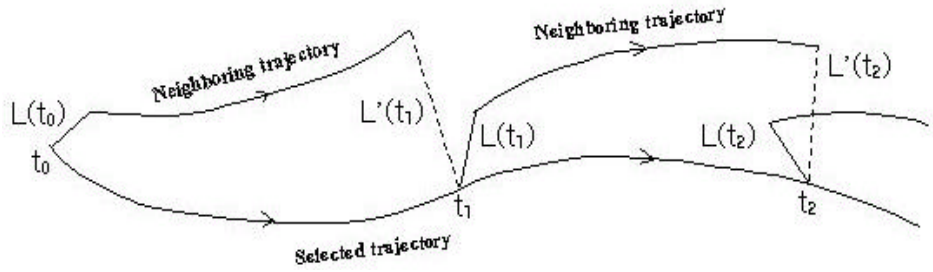


그림 13. Lyapunov 지수의 개념도

주기적인 신호의 경우에는 0을 나타내며, 카오스 신호의 경우에는 양의 값을 나타낸다. 무작위 적인 신호의 경우에도 양의 값을 나타내지만 매립차원에 따른 상관차원값의 수렴성은 보이지 않는다.

4. 뇌파측정 및 실험

4.1. 실험세트 구성

본 실험에서 사용된 뇌파추출기는 BIOPAC사의 MP100A-CE를 사용하였고, samping rate는 256Hz, 12bit의 디지탈 신호로 변환하여 하드디스크에 저장하였다. 뇌파의 전달을 원활하게 하기 위해 전극용 젤을 사용하였다. 뇌파의 측정에는 잡파가 불가피하게 혼입되게 되는데, 규칙적인 잡파로는 교류, 심전도, 호흡에 의한 것을 들 수 있으며, 불규칙적인 것들로는 눈 깜박임, 침을 삼키는 등의 근육활동, 손, 발의 움직임 등을 들 수 있다. 인체에 의해 발생되는 잡파의 영향을 최소화하기 위해 피험자에게 주의를 주었고, 0.5~50Hz의 band-pass filter를 사용하였다. 그 이유는 몸의 움직임에 의해 발생되는 잡파의 주파수 영역이 1Hz미만이라는 사실과 교류에 의한 잡파를 고려하였기 때문이다.

그림 14. 실험세트

4.2. 청각자극에 의한 뇌파추출

뇌파 측정을 위해 국제전극배치 10-20system에 의거하여 8개의 전극(F3, F4, C3, C4, P3, P4, T3, T4)을 두피에 배치했으며, 기준전극으로는 양쪽 귀(A1, A2)로 하였다.

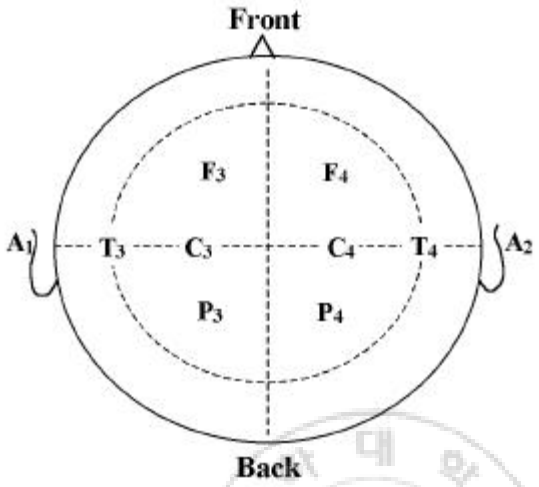


그림 15. 실험에 사용된 전극배치도

청각에 이상이 없는 5명의 피험자들에게 긍정, 부정의 감성을 유발하는 여러 종류의 청각자극을 제시하여 뇌파를 추출하였고, 실험 후 피험자가 가장 긍정적이다라고 응답한 청각자극과 가장 부정적이다라고 응답한 청각자극 제시시의 뇌파를 대상으로 분석을 행하였다. 긍정적 자극으로는 클래식음악을 이용하였고, 부정적 자극으로는 대피 싸이렌소리, 치과용 모터소리, 타이어 급제동소리, TV 잡음소리, 제트 비행기 소음 등을 이용하였다. 자극제시는 오디오 시스템을 이용하였고 소리의 크기는 실험시간 동안 고정시켰다.

실험실시 전에, 피험자의 전극cap에 대한 부담감을 덜기 위해 전극 부착 후 피험자가 전극부착 상태에 적응할 수 있도록 5분간의

여유시간을 주었다. 피험자는 편안한 자세로 눈을 감고 긍정자극과 부정자극을 교대로 받게 하였다. 자극제시시간은 한 자극에 대해 60초로 하였고, 그 다음 자극으로 진행하기 전에 2분간의 무자극 상태를 유지하여 전 자극에 대해 회복되도록 하였다. 이렇게 하여 각 전극당 약 15,000개(60초)의 데이터를 추출하였다. 이러한 routine을 한 명의 피험자에 대해 3회 반복 실시하였다.

그림 16. 실험 Routine

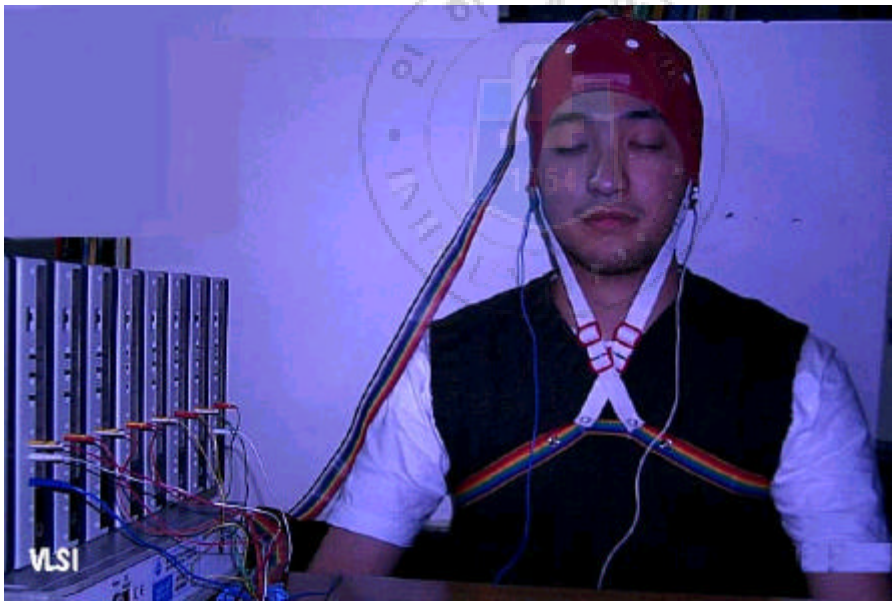


그림 17. 실제 뇌파측정 모습

4.3. 실험결과 및 고찰

실험을 통해 얻은 8개 전극(F3, F4, C3, C4, P3, P4, T3, T4)에 대한 뇌파를 그림 18에 나타내었다.

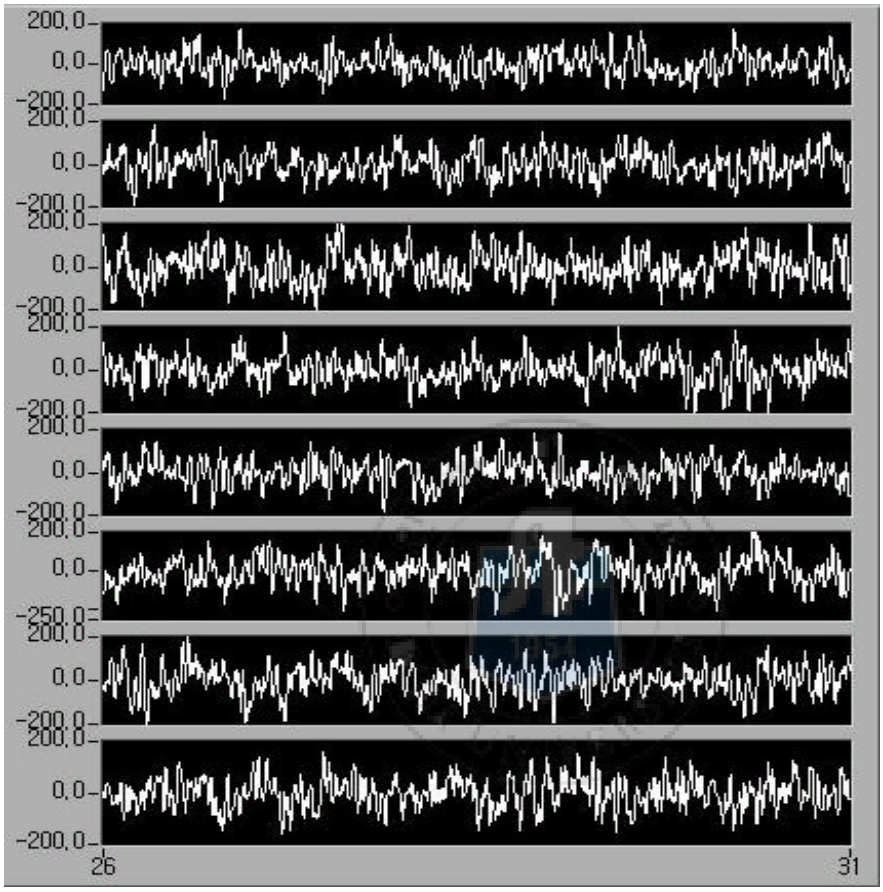


그림 18. 8개 전극에서 추출된 뇌파신호

뇌파의 추출과 분석과정을 도식화해 보면 다음과 같다.

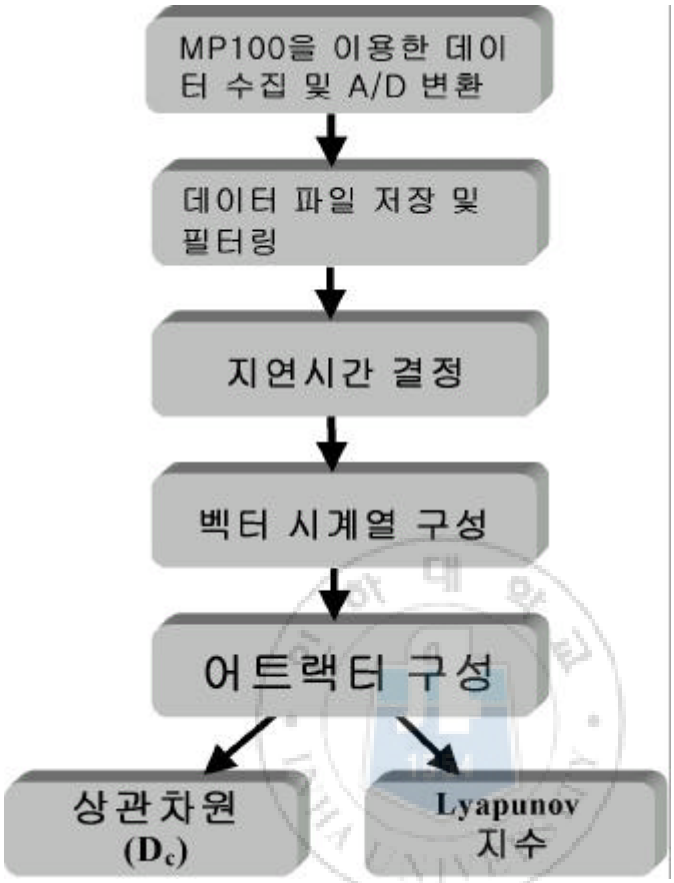


그림 19. 뇌파추출 및 분석과정

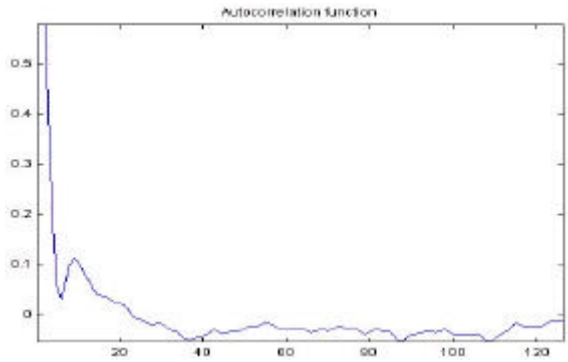


그림 20. 지연시간결정을 위한 자기상관함수

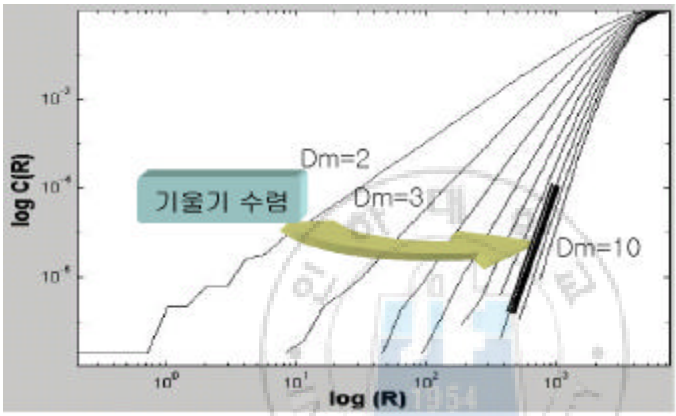


그림 21. 매립차원에 따른 뇌파의 상관적분 곡선

그림21은 매립차원을 2부터 10까지 변화시켜가면서 R에 따른 C(R)의 변화를 Log-Log plot한 것이다. 곡선의 기울기를 선형 증가 구간에 대해 직선 fitting하여보면, 매립차원이 증가되면서 기울기가 포화되는 특성을 보여주고 있다. 이때의 포화되는 기울기를 상관차원으로 취하였다.

4.3.1 긍정, 부정, 휴식상태의 상관차원

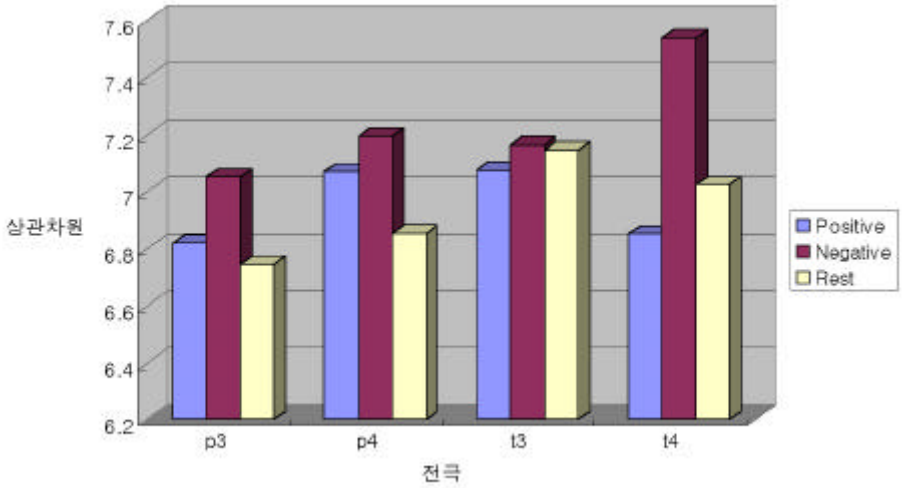
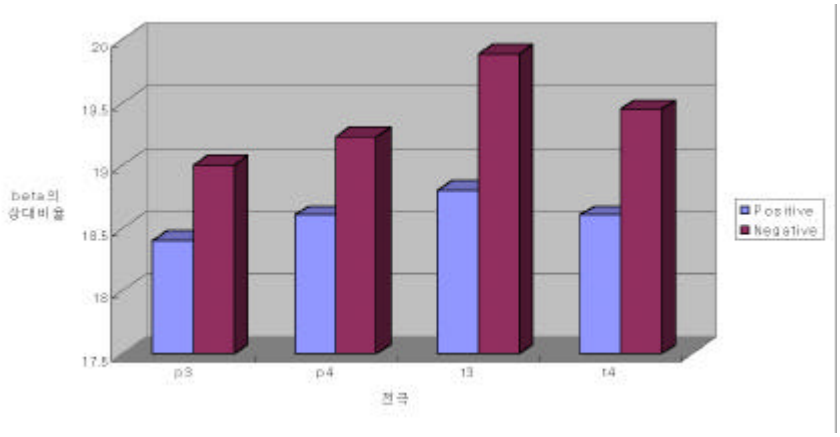


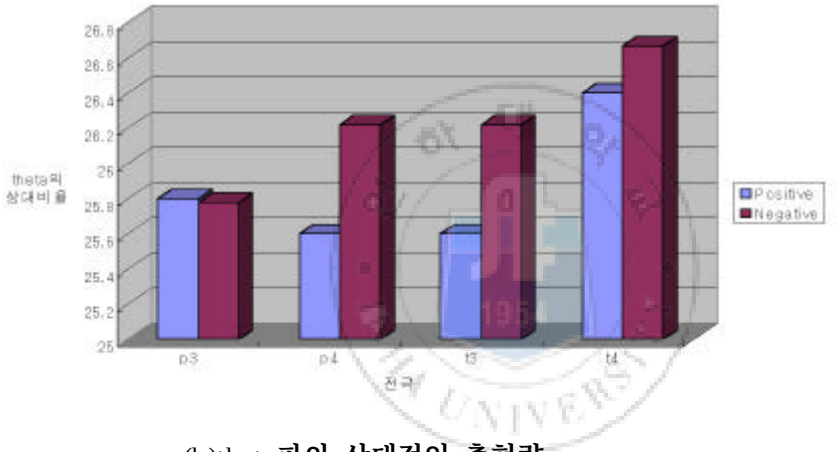
그림 22. 각 상태에서의 전극별 상관차원

그림 22는 5명의 피험자를 대상으로 한 실험에서 8개의 전극 중 유의미한 차이를 보인 P3, P4, T3, T4에서의 상관차원을 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 부정(Negative)상태의 뇌파가 긍정(Positive)상태의 뇌파와 휴식(Rest)상태의 뇌파에 비해 높은 상관차원을 보였다. 이는 부정상태의 뇌의 정보처리가 긍정상태나 휴식상태의 정보처리보다 더 복잡함을 정량적으로 보여주는 것이다.

4.3.2 긍정, 부정상태의 주파수분석



(a)beta파의 상대적인 출현량



(b)theta파의 상대적인 출현량

그림 23. beta파와 theta파의 상대적인 출현량

그림23에 alpha, beta, theta, delta파의 상대적인 출현량 중 긍정, 부정상태에서 유의미하게 차이를 보인 beta, theta파의 상대적인 출현량을 P3, P4, T3, T4전극에 대해 나타내었다.

・beta파의 상대적인 출현량 : beta/ (alpha+beta+theta+delta)

・theta파의 상대적인 출현량 : theta/ (alpha+beta+theta+delta)

4.3.3 각 전극별 Lyapunov 지수

표 1 각 전극별 Lyapunov 지수

전극 / 상태	F3	F4	C3	C4	P3	P4	T3	T4
Positive	0.062	0.054	0.054	0.043	0.048	0.068	0.068	0.059
Negative	0.052	0.047	0.05	0.048	0.055	0.051	0.065	0.049

표1에서는 8개 전극에서의 상태별 Lyapunov 지수를 5명의 피험자에 대해 평균한 값을 보여주고 있다. Lyapunov 지수는 유의미한 차이를 보이지는 않았으나, 양의 값을 확인함으로써 측정전극에서의 뇌파가 카오스 특성을 보임을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 청각자극에 의해 유발되는 인간의 긍정, 부정의 감성을 카오스분석방법을 통해 상관차원, Lyapunov 지수로 정량화 하였다. 8개의 전극에서 측정된 뇌파를 상관차원으로 분석한 결과, P3, P4(두정엽)와 T3, T4(측두엽)전극에서의 상관차원이 유의미한 차이를 보였다. 긍정감성에 비해 부정감성에서 높은 상관차원을 보였는데, 이는 부정감성상태의 뇌파를 기술하기 위해서는 더 많은 변수가 필요하며 부정감성상태에서 뇌의 정보처리가 긍정상태의 정보처리보다 더 복잡함을 정량적으로 보여주는 것이다. 또한 주파수영역에서의 분석을 통해 부정감성 시 P3, P4와 T3, T4전극에서 beta파와 theta파의 상대적인 출현량이 더 많음을 알 수 있었다.

카오스분석을 통해 간과되기 쉬운 신호의 복잡한 변화 속에 숨겨진 동역학 정보를 얻어냄으로써 인간의 감성상태를 정량적으로 표현할 수 있었고, 뇌파와 같은 생체 신호에의 카오스분석도입은 자율신경계를 이해하는 새로운 접근방법과 뇌 질환 진료의 새로운 방법을 제공할 것으로 기대된다.

뇌파는 두피에 전극을 부착하여 측정하므로 측정 시 인체에 아무런 해를 주지 않는다는 이점이 있지만, 이로 인한 Artifact와 피험자간의 분석결과차이 등을 극복하는 문제가 남아있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 Artifact를 제거하는 방법과 분석결과의 DB화에 대한 연구가 필요하다고 본다.

6. 참고문헌

[1] Rodrigo Quian Quiroga, "Quantitative analysis of EEG signals : Time-frequency methods and Chaos theory", 1998

[2] G. L. Baker and J. P. Gollub, "Chotic Dynamics", 1996

[3] **김택수 외4**, "**카오스 특성에 의한 뇌의 활동도분석**", **전기학회논문지**, **제48권**, pp478-485, 1999

[4] Alessandra Celletti, "Low-dimensional chaotic attractors in the rat brain", Biological Cybernetics, 74:pp 387-393, 1996

[5] Grassberger P. Procaccia I, "Measuring the strangeness of strange attractors", Physica D9:189-208, 1983

[6] Kathleen T. Alligood, Tim D. Sauer, James A. Yorke, "Chaos -An Introduction to Dynamical System", 1997

[7] Takens, F., "Detecting strange attractors in turbulence" in Lecture notes in mathematics vol.898 edited by Rand, D. A. and Young L. S., pp 366-381, Springer, Berlin, 1981

[8] Alan Wolf et, al., "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series", Physica 16D, pp 285-317, 1985

[9] **合原一幸**, "**뇌와 카오스**", 1994

[10] A. Casaleggio, A. Corana, "Correlation Dimension Estimation from Electrocardiograms", Pergamon, pp 713-726, 1995

[11] **이창섭**, **노재영**, "**뇌파학 입문**", **하나출판사**, 1997

[12] **조신섭**, **손영숙**, "**시계열 분석**", **율곡출판사**, pp 161-172 1999

감사의 글

먼저, 저를 끝까지 믿어주시고 뒷바라지 해주신 부모님과 누님께 감사를 드립니다. 그리고 2년간의 대학원 생활동안 부족한 저를 지도편달해 주신 이종호 교수님께 감사를 드립니다. 또한 논문심사를 해주신 허욱렬 교수님, 김춘우 교수님께도 감사를 드립니다.

같은 연구실에서 2년동안 동고동락했던 92학번동기들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 700여일 동안 같이 먹고, 자고했던 동한이, 아침잠이 없는 재욱이, 연구에 강한 태서에게 감사를 드립니다. 앞으로 박사가 될 성원이형과 재우에게 감사를 드리고, 졸업한 재영이형에게도 감사를 드립니다. 연구실을 이끌어갈 듬직한 석배와 돈계산에 강한 지훈이에게 감사를 드립니다. 또한 저에게 많은 조언을 해주신 전자과 웅호형에게 고마움을 전하고, 제 친구인 형우, 진호, 용진, 문선이에게도 감사를 드립니다.

끝으로, 헌신적으로 저를 아껴주시고 이끌어주신 부모님께 이 논문을 바칩니다.